

# 东北农田黑土土壤酶活性与理化性质的关系研究

荆瑞勇<sup>1,2</sup>, 曹 焜<sup>1,2</sup>, 刘俊杰<sup>1</sup>, 于镇华<sup>1</sup>, 刘居东<sup>1</sup>,  
隋跃宇<sup>1</sup>, 金 剑<sup>1</sup>, 刘晓冰<sup>1</sup>, 王光华<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 黑土区农业生态重点实验室 东北地理与农业生态研究所,  
哈尔滨 150081; 2. 黑龙江八一农垦大学, 黑龙江 大庆 163319)

**摘 要:**黑土是保证我国粮食安全的最重要的土壤资源之一,主要分布在我国的东北地区。为了调查我国黑土区土壤理化性状、土壤酶活性及两者间相互关系,我们从黑土区不同纬度农田采集了 26 个土壤样品,分析其土壤酶活性与微生物量碳(SMBC)及其它土壤理化性状的关系。结果发现,黑龙江北安黑土土壤全碳、全氮、全磷、碱解氮、SMBC、过氧化氢酶、脲酶及转化酶活性最大;简单相关分析发现,过氧化氢酶、脲酶、磷酸酶及转化酶均与土壤全氮、全碳及 SMBC 呈极显著正相关;通径分析表明,全氮是影响该土壤区土壤酶活性的主导因子,pH 值是通过直接作用或间接作用影响过氧化氢酶活性的另一主导理化因子,全氮是脲酶活性的主导因子,碱解氮、全碳、全氮是磷酸酶活性的主导因子,全氮和 pH 值是影响转化酶的两主导理化因子。

**关键词:**黑土; 土壤酶活性; 土壤理化性状; 通径分析

中图分类号:S154.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)04-0132-06

## Correlation Between Soil Enzyme Activity and Physicochemical Characteristics in Agricultural Black Soils in Northeast China

JING Ruiyong<sup>1,2</sup>, CAO Kun<sup>1,2</sup>, LIU Junjie<sup>1</sup>, YU Zhenhua<sup>1</sup>, LIU Judong<sup>1</sup>,  
SUI Yueyu<sup>1</sup>, JIN Jian<sup>1</sup>, LIU Xiaobing<sup>1</sup>, WANG Guanghua<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese academy of Sciences, Harbin 150081, China; 2. Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

**Abstract:** Black soil is one of most important resources in ensuring food security in China and spreads mainly in north-east China. To investigate the soil enzyme activity, physicochemical characteristic and their correlations, 26 soil samples were collected from black soil zone with different latitudes, the distribution trait of soil enzyme activity, correlation with soil microbial biomass carbon (MBC) and other physicochemical characteristics were analyzed. The results showed that the levels of soil total carbon, soil total nitrogen, total phosphate, available nitrogen, MBC, catalase, urease and invertase activity in site of Bei-An were maximum. Simple correlation analysis showed that there was a significantly positive correlation between four soil enzyme activities and soil total nitrogen, total carbon and MBC. The results of path analysis showed that soil total nitrogen was the dominant factor affecting soil enzyme activity of the tested soils, pH value was the other dominant factor affecting catalase activity in the direct or indirect ways, soil total nitrogen was dominant factor affecting urease activity, available nitrogen, soil carbon and total nitrogen were the dominant factors affecting soil phosphatase activity, soil total nitrogen and pH value were the key dominant factors affecting invertase activity in the tested zone.

**Keywords:** black soil; soil enzyme activity; soil physicochemical characteristics; path analysis

东北黑土区是世界四大片黑土之一,主要分布在我国黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古地区的部分地区。黑土区土地肥沃,雨热同季,光照充足,具有良好的农业生产条件,是我国重要的商品粮生产基地,其土壤理化性质及其肥力对农业可持续发展至关重要。土

壤酶与土壤理化性质具有密切的相关性,参与许多生物化学反应及土壤物质循环,可反映土壤生物化学过程的方向和强度<sup>[1-3]</sup>。国内外众多学者已开展了不同生态环境土壤酶与理化性质之间的研究<sup>[1,3]</sup>,如林地<sup>[4-5]</sup>、农田<sup>[6]</sup>及草地<sup>[7]</sup>等。但关于东北黑土区土壤

酶与理化性质的关系鲜有报道。

东北黑土农田面临着土壤肥力下降、水土流失严重、土壤酸化、旱涝、盐碱化、沙化、理化性质恶化等问题<sup>[8]</sup>。由于该地区所处位置及黑土对农业生产的重要性,从土壤酶活性角度来探索其在黑土区分布及与农田黑土理化性质关系的研究还鲜有报道。本研究以东北黑土不同纬度的农田土壤样品为材料,测定其土壤理化性质、酶活性,研究东北农田黑土土壤酶活性及理化性质的分布特征;运用通径分析方法揭示土壤酶活性与理化因子间的内存关系,旨在为当地的农业生产、环境保护和可持续发展提供数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤样品的采集

土壤样品依据我国东北黑土区分布的纬度及土壤养分,尤其是土壤全碳含量的变化采集。本研究于2012年9月24日至9月29日共采集具有不同全碳含量农田黑土样品26个。所有样品均在大豆和玉米接近成熟期采集。在每个采样点,土样均采集于100 m<sup>2</sup>左右大小的10个耕层(0—20 cm)土样。每个土样通过2 mm筛,使其均匀,并除去根系、植株残体及石块。土壤样品放置于4℃冰箱保藏,待测土壤酶活性,其余土壤测定土壤理化性质。

### 1.2 测定内容及方法

土壤酶活性测定:过氧化氢酶采用KMnO<sub>4</sub>滴定法;脲酶活性采用比色法;磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法;转化酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法进行<sup>[9]</sup>;土壤含水量采用烘干法,pH值采用pH计测定;全碳和全氮采用元素分析仪测定,速效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法;速效钾采用火焰光度法;速效氮采用碱解扩散法<sup>[10]</sup>,微生物量碳(SMBC)采用氯仿熏蒸—K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提法测定,转化系数K采用0.45<sup>[11]</sup>。

### 1.3 数据处理

数据处理采用SAS 9.1软件进行处理。土壤理化性质(8项指标)与酶活性(4种酶活)均采用平均值(n=3)进行相关性分析(Pearson, n=26);在数据正态分布检验、数据转换(采用土壤酶活性的对数值)的基础上,建立土壤酶活性与理化因子的多元线性回归方程并完成显著性检验;利用通径分析方法计算理化因子对土壤酶活性的直接、间接通径系数和决定系数。

## 2 结果与分析

### 2.1 东北黑土区土壤分布特征及其理化性质分析

供试26个黑土样品主要分布在42°50′—49°07′N及124°07′—127°11′E,土壤pH值在4.56~6.57变动;

土壤全碳含量在11.77~53.53 g/kg,最大值约为最小值近4倍。土壤全氮含量在0.99~4.25 g/kg,最大值也为最小值4倍多。碱解氮含量在121.7~334.6 mg/kg,土壤微生物量碳含量(SMBC)在64~595 mg/kg,相差近9倍左右。土壤总磷在0.63~1.49 g/kg,速效磷在16.0~52 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> mg/kg;速效钾在7.89~16.95 mg/kg(表1)。供试土壤的部分理化性质已在前期发表的关于我国东北黑土区细菌群落地理分布格局中进行了报道<sup>[12]</sup>。

### 2.2 东北黑土区土壤酶活性的分布状况

供试26个黑土样品中土壤过氧化氢酶活性为112.3~375.83 ml 0.1 N KMnO<sub>4</sub> g/3 h,其活性相差2.3倍,最大值出现在北安黑土样品中;脲酶活性为94.15~327.57 μg NH<sub>3</sub>-N g/h,相差近2.5倍,最大值出现在北安黑土样品中;磷酸酶活性为0.14~2.05 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> g/h,相差近13.6倍,最大值出现在嫩江黑土样品中;土壤转化酶活性为19.63~87.82 mg glucose g/d,相差近3.5倍,最大值出现在北安黑土样品中(表1)。

### 2.3 东北黑土区土壤酶活性与土壤理化性质的关系

将东北农田黑土4种酶土壤活性[过氧化氢酶(y<sub>1</sub>)、脲酶(y<sub>2</sub>)、磷酸酶(y<sub>3</sub>)和转化酶(y<sub>4</sub>)]与8种土壤理化因子[(土壤全碳(x<sub>1</sub>)、全氮(x<sub>2</sub>)、总磷(x<sub>3</sub>)、pH值(x<sub>4</sub>)、碱解氮(x<sub>5</sub>)、速效钾(x<sub>6</sub>)、SMBC(x<sub>7</sub>)和速效磷(x<sub>8</sub>)]进行相关性分析(表2),发现土壤过氧化氢酶活性与土壤全碳、全氮、总磷、pH值、速效钾、SMBC呈极显著正相关,与碱解氮含量呈显著正相关,与土壤速效磷含量无显著相关性;土壤脲酶活性与土壤全碳、全氮、总磷、碱解氮、速效钾、SMBC呈极显著正相关,而与土壤pH值和速效磷含量无相关性;土壤磷酸酶活性与土壤全碳、全氮、碱解氮、SMBC呈极显著正相关,与土壤总磷呈显著正相关,而与土壤pH值、速效磷无显著相关性;土壤转化酶活性与土壤全碳、全氮、总磷、pH值、碱解氮、SMBC呈极显著正相关,与土壤速效钾呈显著正相关,而与土壤速效磷含量无相关性。供试农田黑土样品理化性质中速效磷含量与土壤酶无显著相关性,而其他理化指标均与4种土壤酶呈显著或极显著的相关关系(y<sub>2</sub>与x<sub>4</sub>和y<sub>3</sub>与x<sub>4</sub>除外)。因此,简单相关分析得出该地区土壤酶与理化性质关系为:除速效磷与土壤酶无显著相关性外,其他土壤理化性质均与土壤酶呈显著或极显著相关,为深入分析土壤理化性质对土壤酶活性的直接影响还是间接影响,进行了通径分析。

表 1 东北黑土区供试采样点主要特征、0—20 cm 土壤理化性状及土壤酶活性

样品	地点	经纬度	作物	pH	全碳/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	含水量/ %	SMB/C/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	过氧化氢酶/ (ml·g <sup>-1</sup> ·3 h <sup>-1</sup> )	脲酶/(μg ·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	磷酸酶/(mg ·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	转化酶/(mg ·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )
CT1	昌图,辽宁	42°50'N,124°07'E	玉米	5.68	14.04	1.17	22	118	0.90	52.0	129.4	10.69	182.64	113.94	0.38	19.63
CT2	昌图,辽宁	43°05'N,124°20'E	玉米	5.46	14.58	1.02	21	119	0.63	18.5	127.8	9.72	153.44	161.95	0.44	41.59
LS	梨树,吉林	43°20'N,124°28'E	玉米	6.02	11.77	0.99	25	64	0.64	17.0	125.7	9.06	255.72	114.00	0.27	31.82
GZL	公主岭,吉林	43°26'N,124°43'E	玉米	5.50	14.40	1.12	23	142	0.90	31.5	121.7	11.04	148.73	109.71	0.46	33.59
CC	长春,吉林	43°37'N,125°34'E	玉米	4.95	15.59	1.26	21	111	1.44	48.0	129.4	11.40	121.81	104.02	0.39	32.64
DH1	德惠,吉林	44°12'N,125°33'E	玉米	4.79	17.45	1.44	22	123	0.73	40.5	158.2	11.04	125.30	94.15	0.53	33.87
DH2	德惠,吉林	44°31'N,125°45'E	玉米	4.56	14.26	1.30	22	178	0.80	28.0	210.0	8.14	112.30	120.11	0.51	41.5
YS	榆树,吉林	44°53'N,126°14'E	玉米	5.27	20.03	1.74	22	278	0.81	18.5	152.1	12.77	205.43	136.91	0.72	49.88
FY	富余,吉林	45°06'N,126°11'E	玉米	5.78	19.97	2.03	18	179	0.86	16.0	158.2	10.69	231.41	180.33	0.24	62.20
SC	双城,黑龙江	45°23'N,126°22'E	玉米	6.53	17.02	1.68	23	201	0.98	29.5	121.7	10.64	262.89	184.29	0.14	73.91
HRB	哈尔滨,黑龙江	45°41'N,126°38'E	大豆	6.57	26.36	1.69	23	319	1.39	66.5	133.9	15.98	228.38	192.23	0.27	59.98
HL1	呼兰,黑龙江	46°06'N,127°02'E	玉米	5.18	19.76	1.42	22	148	0.74	17.0	177.8	9.67	188.09	98.66	0.60	45.66
BY	巴彦,黑龙江	46°23'N,127°11'E	玉米	5.87	26.41	1.90	25	222	1.14	50.0	182.5	16.95	265.18	230.35	0.51	62.95
SH	绥化,黑龙江	46°41'N,126°58'E	玉米	5.18	18.91	1.41	24	109	0.82	28.0	158.2	11.45	182.19	148.68	0.66	41.03
SL	绥化,黑龙江	47°13'N,127°07'E	玉米	5.19	27.07	1.90	30	144	0.67	38.0	191.3	9.77	185.03	206.02	0.86	35.08
HL	海伦,黑龙江	47°27'N,126°55'E	玉米	5.42	29.97	2.12	27	176	1.14	25.0	223.1	10.69	216.30	150.67	0.89	62.77
BQ	白泉,黑龙江	47°35'N,126°07'E	玉米	4.98	23.41	1.95	26	274	0.85	42.5	212.9	13.03	190.49	146.91	0.89	32.43
KD	克东,黑龙江	48°09'N,126°13'E	大豆	5.41	32.03	2.45	24	323	1.08	31.5	237.3	10.23	216.72	123.31	0.87	44.54
BA	北安,黑龙江	48°09'N,126°43'E	大豆	6.10	53.53	4.25	40	595	1.49	36.0	334.6	15.17	375.83	327.57	1.81	87.82
WC1	五大连池,黑龙江	48°28'N,126°15'E	大豆	5.43	29.92	2.36	28	279	1.13	27.0	252.7	9.67	179.41	166.36	1.37	53.47
WC2	五大连池,黑龙江	48°52'N,126°08'E	大豆	5.39	36.76	3.06	35	292	1.33	22.0	275.8	12.57	234.34	293.18	1.94	71.89
NH1	讷河,黑龙江	48°41'N,124°59'E	玉米	5.35	24.78	1.93	28	218	0.92	27.5	194.7	7.89	161.89	135.03	1.47	48.01
NH2	讷河,黑龙江	48°23'N,124°55'E	大豆	5.97	23.68	1.84	25	195	0.87	25.0	182.5	11.50	143.65	108.52	1.35	64.52
NJ1	嫩江,黑龙江	49°08'N,125°37'E	玉米	5.53	31.71	2.50	28	227	1.29	42.5	249.5	10.38	170.54	153.13	1.67	55.85
NJ2	嫩江,黑龙江	49°26'N,125°26'E	小麦	5.17	37.23	2.96	33	439	1.23	24.5	259.6	13.23	234.89	234.03	2.05	65.13
NJ3	嫩江,黑龙江	49°07'N,125°13'E	大豆	5.32	20.63	1.64	26	232	0.95	42.0	178.4	12.21	181.22	168.32	1.40	43.96

注: \* SMB/C 为微生物量碳含量,表中各项指标为三次重复的平均值。

表 2 东北农田黑土土壤酶活性与土壤理化性质相关性分析

指标	全碳	全氮	总磷	pH 值	碱解氮	速效钾	SMBC	速效磷
过氧化氢酶	0.623**	0.646**	0.402*	0.626**	0.405*	0.541**	0.641**	-0.022
脲酶	0.770**	0.782**	0.543**	0.338	0.613**	0.576**	0.712**	0.064
磷酸酶	0.767**	0.768**	0.448*	-0.142	0.831**	0.131	0.643**	-0.127
转化酶	0.708**	0.743**	0.568**	0.509**	0.552**	0.448*	0.679**	-0.160

\* 表示土壤酶活性值与土壤理化指标的相关系数在  $p<0.05$  达到显著水平,\*\* 表示土壤酶活性值与土壤理化指标的相关系数在  $p<0.01$  达到极显著水平;下同。

将土壤酶活性测定结果进行正态性检验,数据做标准化处理,获得的数据过氧化氢酶( $U_1$ )、脲酶( $U_2$ )、磷酸酶( $U_3$ )和转化酶( $U_4$ )与显著相关的 7 项理化因子进行多元线性回归分析,得到标准多元回归方程(表 3)。

表 3 东北农田黑土土壤酶关于土壤理化性质的多元线性回归分析

回归方程	F 值	p 值	R <sup>2</sup>
$U_1 = -0.347x_1 + 0.881x_2 - 0.259x_3 + 0.580x_4 + 0.183x_5 + 0.346x_6 - 0.243x_7$	6.31	<0.01	0.711
$U_2 = -0.157x_1 + 0.706x_2 - 0.125x_3 + 0.247x_4 + 0.141x_5 + 0.320x_6 - 0.060x_7$	4.45	<0.01	0.634
$U_3 = 0.817x_1 - 0.656x_2 - 0.054x_3 - 0.187x_4 + 0.627x_5 - 0.033x_6 + 0.083x_7$	7.51	<0.01	0.745
$U_4 = -0.074x_1 + 0.845x_2 - 0.344x_3 + 0.521x_4 - 0.072x_5 + 0.271x_6 - 0.094x_7$	7.13	<0.01	0.735

标准化的过氧化氢酶( $U_1$ )、脲酶( $U_2$ )、磷酸酶( $U_3$ )和转化酶( $U_4$ )与土壤理化性质的多元线性回归方程均达到极显著水平( $p<0.01$ ),其中,自变量  $x_1-x_7$  可以分别解释 71.1%,63.4%,74.5%和 73.5%的  $y_1-y_4$  的变化,误差分别为 28.9%,36.6%,25.5%和 26.5%。通径分析通过直接通径系数和间接通径系数来分析相关变量对因变量的直接效应与间接效应。表 3 中回归方程中的系数为直接通径系数,由表可见,过氧化氢酶直接通径系数大小顺序为:土壤全氮(0.881)>pH 值(0.580)>土壤全碳(0.347)>速效钾(0.346)>总磷(0.259)>SMBC(0.243)>碱解氮(0.183);脲酶的直接通径系数大小顺序为:土壤全氮(0.706)>速效钾(0.320)>pH 值(0.247)>土壤全碳(0.157)>碱解氮(0.141)>总磷(0.125)>SMBC(0.060);磷酸酶的直接通径系数大小顺序为:土壤全碳(0.817)>土壤全氮(0.656)>碱解氮(0.627)>pH 值(0.187)>SMBC(0.083)>总磷(0.054)>速效钾(0.033);转化酶的直接通径系数大小顺序为:土壤全氮(0.845)>pH 值(0.521)>总磷(0.344)>速效钾(0.271)>SMBC(0.094)>土壤全碳(0.074)>碱解氮(0.072)。间接通径系数为直接通径系数与各因子间相关系数的乘积(表 4),反映某一理化因子通过作用于其他因子对土壤酶的活性。这种影响力更客观地表征土壤酶活性的实际情况。

过氧化氢酶是参与土壤物质和能量转化的一类重要的氧化还原酶,具有分解土壤中对植物有害的过氧化氢的作用,在一定程度上反映土壤生物化学过程的强度。如表 4 所示,pH 值对过氧化氢酶的直接通径系数较大,而通过影响土壤全氮和速效钾的作用得到更大的间接通径系数,具有叠加效应。土壤全碳和

SMBC 对过氧化氢酶的直接影响是负效应(-0.35 和 -0.24),而土壤全碳和 SMBC 通过与土壤全氮作用后对过氧化氢的间接作用为正效应(0.85,0.75)。土壤速效钾含量对过氧化氢酶的直接影响较小(0.35),但通过 pH 值和全氮的作用对过氧化氢酶的影响较大。因此,供试土壤区影响过氧化氢酶活性的主要理化因子是 pH 值、全氮、全碳、速效钾。

全碳和 SMBC 对脲酶的直接影响是负效应(-0.16 和 -0.06),而全碳和 SMBC 通过与土壤全氮的作用后对过氧化氢酶的间接作用为正效应(0.68,0.60)。土壤碱解氮、总磷、pH 值及速效钾对脲酶的直接效应较小,而通过对全氮的作用对脲酶的间接效应变得更大。但整体上影响土壤脲酶活性大小的主要土壤理化性质是土壤全碳、全氮及 SMBC。

碱解氮对土壤磷酸酶活性的直接通径系数较大(0.63),但通过对土壤全碳、全氮的作用间接地影响着磷酸酶,使其显著影响着磷酸酶的活性;这与冉启洋的研究结果一致<sup>[13]</sup>。土壤全氮对磷酸酶直接作用为负效应,而通过作用于全碳、碱解氮的作用使其明显影响着磷酸酶活性,变为正效应。总磷、pH 值、速效钾对磷酸酶活性影响较小。因此,影响供试土壤的磷酸酶活性的主要理化指标是碱解氮、全碳和全氮。

全碳和 SMBC 对转化酶的直接通径系数均较小(-0.07 和 -0.09),但通过作用于土壤全氮明显影响着转化酶的活性,其间接通径系数为(0.82,0.75)。pH 值对转化酶的直接通径系数较大(0.52),通过作用于全氮、速效钾,间接提高对转化酶的影响。总磷和碱解氮对转化酶的直接和间接通径系数均较小。因此,影响供试区土壤转化活性主要是 pH 值,全氮、全碳及 SMBC。

表 4 东北农田黑土土壤酶活性与理化性质的通径系数

因变量	自变量	通径系数							总和
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	
过氧化氢酶	$x_1$	−0.35	0.85	−0.17	0.09	0.16	0.15	−0.20	0.53
	$x_2$	−0.33	0.88	−0.17	0.09	0.16	0.13	−0.21	0.56
	$x_3$	−0.23	0.57	−0.26	0.14	0.08	0.19	−0.16	0.34
	$x_4$	−0.06	0.14	−0.06	0.58	−0.03	0.13	−0.04	0.65
	$x_5$	−0.30	0.76	−0.12	−0.11	0.18	0.04	−0.17	0.29
	$x_6$	−0.15	0.34	−0.14	0.22	0.02	0.35	−0.12	0.52
	$x_7$	−0.29	0.75	−0.17	0.10	0.13	0.18	−0.24	0.47
脲酶	$x_1$	−0.16	0.68	−0.08	0.04	0.12	0.14	−0.05	0.69
	$x_2$	−0.15	0.71	−0.08	0.04	0.12	0.12	−0.05	0.71
	$x_3$	−0.10	0.46	−0.13	0.06	0.07	0.17	−0.04	0.49
	$x_4$	−0.03	0.11	−0.03	0.25	−0.03	0.12	−0.01	0.38
	$x_5$	−0.14	0.61	−0.06	−0.05	0.14	0.04	−0.04	0.51
	$x_6$	−0.07	0.28	−0.07	0.09	0.02	0.32	−0.03	0.54
	$x_7$	−0.13	0.60	−0.08	0.04	0.10	0.16	−0.06	0.64
磷酸酶	$x_1$	0.82	−0.63	−0.04	−0.03	0.54	−0.01	0.07	0.72
	$x_2$	0.78	−0.66	−0.04	−0.03	0.54	−0.01	0.07	0.66
	$x_3$	0.53	−0.42	−0.05	−0.05	0.29	−0.02	0.05	0.34
	$x_4$	0.13	−0.10	−0.01	−0.19	−0.12	−0.01	0.01	−0.28
	$x_5$	0.70	−0.57	−0.03	0.03	0.63	0.00	0.06	0.83
	$x_6$	0.36	−0.26	−0.03	−0.07	0.08	−0.03	0.04	0.09
	$x_7$	0.68	−0.56	−0.03	−0.03	0.45	−0.02	0.08	0.57
转化酶	$x_1$	−0.07	0.82	−0.23	0.09	−0.06	0.12	−0.08	0.58
	$x_2$	−0.07	0.85	−0.22	0.09	−0.07	0.11	−0.08	0.59
	$x_3$	−0.05	0.55	−0.34	0.14	−0.04	0.15	−0.06	0.35
	$x_4$	−0.01	0.14	−0.09	0.52	0.01	0.10	−0.02	0.64
	$x_5$	−0.07	0.76	−0.18	−0.07	−0.07	0.05	−0.07	0.35
	$x_6$	−0.03	0.34	−0.19	0.20	−0.01	0.27	−0.05	0.52
	$x_7$	−0.06	0.75	−0.22	0.12	−0.05	0.15	−0.09	0.58

注：下划横线的数字为直接通径系数，其他数字为间接通径系数。

从决定因子计算结果(见表 5)可见,任意两因子对土壤酶(磷酸酶除外)的共同作用均较小。影响土壤酶的环境因子相对较单一。土壤全氮和 pH 值对过氧化氢酶决定系数较大,分别为 0.78,0.34,是影响过氧化氢酶活性大小的主导理化因子;全氮对脲酶决定因子相对较大(0.50),是影响脲酶活性的主导理化因子。全碳、全氮和碱解氮对磷酸酶的决定系数分别为 0.67,0.43,0.39,相对较大,是影响磷酸酶的主导理化因子。全氮和 pH 值对转化酶的决定系数相对较大,分别为 0.71,0.27,是影响转化酶的主导理化因子。

3 讨论与结论

近年来,采用通径分析对不同生态环境下土壤酶活性及其理化性质的关系相关报道已很多,主要有林地<sup>[4-5]</sup>、农田<sup>[6,14]</sup>及草地<sup>[7]</sup>等。采用简单相关分析结果相对单一,本研究通过简单相关分析发现,测试的

四种土壤酶活性均与土壤全碳、全氮、SMBC 呈极显著正相关。这一结果与李秀玲研究结果相一致<sup>[15]</sup>。研究若尔盖湿地土壤酶活性时发现,土壤转化酶与土壤有机质、全氮呈极显著正相关。表明土壤肥力是影响酶活性的重要影响因子,农田施肥(主要指有机肥和氮肥),有利于提高酶活性,对土壤酶来讲,有机肥料既是土壤微生物的营养源和能源,也是土壤酶发挥性能的良好场所<sup>[5]</sup>。草原土壤酶活性与土壤有机质、全氮之间也具有显著的相关性<sup>[2]</sup>。

采用通径分析的方法研究东北农田黑土土壤酶和理化性质关系发现,土壤全氮是影响土壤酶活性的主导因子;这一结果与贡璐研究塔里木上游典型绿洲连作棉田时一致,全氮也是影响该地区土壤酶活性的直接主导因子<sup>[6]</sup>。不同生态环境下,影响土壤酶活性的主导因子不同。舒蛟靖等<sup>[4]</sup>对华山松人工林土壤酶活性与理化因子的通径分析表明,土壤有机质是影

响土壤酶活性的主导因子。田幼华等<sup>[16]</sup>对艾比湖湿地自然保护区 38 个样地,17 种植物群落内的 21 种植物进行了土壤酶、有机质、盐分、pH 值相关性分析,发现干旱区土壤有机质作为土壤酶底物的重要补给源,与土壤酶活性呈极显著相关。即使在相同农田生态系统中,不同的地区影响土壤酶活性的理化因子不同。吴雪等<sup>[6]</sup>对塔里木河上游阿拉尔垦区研究时发现,速效磷对脲酶和转化酶存在显著的直

接正效应,是影响脲酶和转化酶活性的主导因子;速效钾是影响过氧化氢酶和转化酶活性的重要因素。表明不同土壤类型酶活性的主要理化因子不同,这与刘晓星的研究结果相同<sup>[17]</sup>。于天一等<sup>[1]</sup>研究不同母质类型水稻土壤酶活性与理化性质的关系时,发现土壤蔗糖酶与有机质、全氮含量呈显著正相关关系。而酸性磷酸酶、脲酶、过氧化氢酶与有机质和全氮无显著相关性。

表 5 东北黑土理化性质通径分析的决定系数

因变量	自变量	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$
过氧化氢酶	$x_1$	0.12	-0.29	0.06	-0.03	-0.05	-0.05	0.07
	$x_2$		0.78	-0.15	0.08	0.14	0.12	-0.18
	$x_3$			0.07	-0.04	-0.02	-0.05	0.04
	$x_4$				0.34	-0.02	0.08	-0.03
	$x_5$					0.03	0.01	-0.03
	$x_6$						0.12	-0.04
	$x_7$							0.06
脲酶	$x_1$	0.02	-0.11	0.01	-0.01	-0.02	-0.02	0.01
	$x_2$		0.50	-0.06	0.03	0.09	0.09	-0.03
	$x_3$			0.02	-0.01	-0.01	-0.02	0.00
	$x_4$				0.06	-0.01	0.03	0.00
	$x_5$					0.02	0.01	-0.01
	$x_6$						0.10	-0.01
	$x_7$							0.00
磷酸酶	$x_1$	0.67	-0.51	-0.03	-0.02	0.44	-0.01	0.06
	$x_2$		0.43	0.02	0.02	-0.36	0.01	-0.05
	$x_3$			0.00	0.00	-0.02	0.00	0.00
	$x_4$				0.04	0.02	0.00	0.00
	$x_5$					0.39	0.00	0.04
	$x_6$						0.00	0.00
	$x_7$							0.01
转化酶	$x_1$	0.01	-0.06	0.02	-0.01	0.00	-0.01	0.01
	$x_2$		0.71	-0.19	0.07	-0.05	0.09	-0.07
	$x_3$			0.12	-0.05	0.01	-0.05	0.02
	$x_4$				0.27	0.01	0.05	-0.01
	$x_5$					0.01	0.00	0.01
	$x_6$						0.07	-0.01
	$x_7$							0.01

在东北黑土农田中,pH 值通过直接作用或间接作用影响着土壤过氧化氢酶和转化酶的活性,土壤全碳和碱解氮也通过直接作用或间接作用影响着土壤磷酸酶的活性,它们也是影响土壤酶活性的重要理化因子。冉启洋等<sup>[13]</sup>对艾比湖自然保护区土壤理化性质和酶活性进行通径分析发现,土壤有机质是影响该地区的主导因子,速效磷对过氧化氢酶活性影响较大,全氮是脲酶活性的主导因子,碱解氮是磷酸酶和蔗糖酶活性主要影响因素。为何不同农田或土壤类型中影响土壤酶的主导理化因子不同(全碳或全氮),

笔者认为微生物是土壤酶活性主要来源,而不同类群微生物生长所需 C/N 比存在差异,笔者推测与该地区土壤微生物菌落有关,有待深入研究。

简单相关分析发现 4 种酶活性均与土壤全碳、全氮及 SMBC 呈极显著正相关。通径分析表明,全氮是影响该土壤区土壤酶活性的主导因子,pH 值是通过直接作用或间接作用影响过氧化氢酶活性的另一主导理化因子,全氮是脲酶活性的主导因子,碱解氮、全碳、全氮是磷酸酶活性的主导因子,全氮和 pH 值是影响转化酶的两大大主导理化因子。

表层蠕移,在气流搬运的砂粒总量中,跃移质约占3/4,蠕移质约占1/4,悬移质的数量极少。风力侵蚀的类型有吹蚀、磨蚀及剥蚀和堆积。

(2) 无论是流动沙丘还是固定沙丘,沙丘迎风坡各部位的土壤剥蚀深度均随着风速的加大而增加,呈明显的正相关。流动沙丘三个部位的剥蚀深度由小到大的排序为坡脚、坡顶和坡中,固定沙丘坡顶的剥蚀深度明显高于坡脚和坡中。

(3) 无论是流动沙丘还是固定沙丘,随着风速的加大,背风坡的坡中与坡脚的土壤堆积厚度均有不同程度的增加,呈显著的正相关,而坡顶的堆积厚度与风速呈负相关。

(4) 一年内观测到的流动沙丘,半流动沙丘,固定沙丘的平均风蚀强度分别为167.9,57.8,4.2 mm/d。

#### 参考文献:

- [1] 唐灿,孟晖.河西走廊地区土地荒漠化问题分析[J].中国地质灾害与防治学报,1999,10(4):47-55.
- [2] 国家计委,国家科委.中国二十一世纪议程[M].北京:中国环境科学出版社,1994.
- [3] 王敏.论辽西北部风蚀沙化已有防治措施的利弊[J].

防护林科技,2012(3):63-64,86.

- [4] 吴波.我国荒漠化现状,动态与成因[J].林业科学研究,2001,14(2):195-202.
- [5] 赵正华.固沙用新材料及野外固沙综合技术研究[D].兰州:兰州大学,2006.
- [6] 范俊玉.政治学视阈中的生态环境治理研究[D].江苏苏州:苏州大学,2010.
- [7] 董胜君,白雪峰,付青山.辽宁西北部地区土地沙漠化成因及防治对策[J].沈阳农业大学学报:社会科学版,2006,8(1):61-63.
- [8] 李智慧,姜延辉.灌木草场培育技术在辽北沙地治理中的应用[J].吉林水利,2007(S):87-88,91.
- [9] 李春龙,刁占峰,张素芬.辽西北沙漠化土地生态修复技术研究[J].水土保持应用技术,2009(6):40-41.
- [10] 杨树军,张学利.辽宁省西北部土地沙漠化的成因,现状及治理对策[J].防护林科技,2005(1):71-73.
- [11] 闫向阳.辽宁省彰武县阿尔乡围封沙地土壤动物生态研究[J].辽宁大学学报:自然科学版,2012,39(2):127-130.
- [12] 徐丕海.沙丘地区高速公路绿化设计研究[J].北方交通,2011(2):39-41.
- [13] 白佳希.风积沙地区彰武至阿尔乡高速公路绿化设计[J].沈阳农业大学学报:社会科学版,2011,13(3):361-364.

(上接第137页)

#### 参考文献:

- [1] 于天一,逢焕成,唐海明,等.不同母质类型水稻土酶活性及其与理化性质的关系[J].土壤学报,2013,50(5):1043-1047.
- [2] 王杰,李刚,修伟明,等.氮素和水分对贝加尔针茅草原土壤酶活性和微生物量碳氮的影响[J].农业资源与环境学报,2014,31(3):237-245.
- [3] 苏洁琼,李新荣,鲍婧婷.施氮对荒漠化草原土壤理化性质及酶活性的影响[J].应用生态学报,2014,25(3):664-670.
- [4] 舒蛟靖,陈奇伯,王艳霞,等.华山松人工林土壤酶活性与理化因子的通径分析[J].东北林业大学学报,2014,42(9):88-93.
- [5] 吴永铃,王兵,戴伟,等.杉木人工林土壤酶活性与土壤性质的通径分析[J].北京林业大学学报,2012,34(2):78-83.
- [6] 吴雪,贡璐,冉启洋,等.阿拉尔垦区土壤理化因子与酶活性的通径分析[J].水土保持研究,2013,20(3):48-54.
- [7] 安韶山,黄懿梅,郑粉莉.黄土丘陵区草地土壤脲酶活性特征及其与土壤性质的关系[J].草地学报,2005,13(3):233-237.
- [8] 魏丹,杨谦,迟凤琴.东北黑土区土壤资源现状与存在问题[J].黑龙江农业科学,2006(6):69-72.
- [9] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:科学技术出版

社,1987.

- [10] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1977.
- [11] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass[J]. Soil Biology & Biochemistry,1987,19(6):703-707.
- [12] Liu J, Sui Y, Yu Z, Shi Y, Chu H, Jin J, Liu X, Wang G. High throughput sequencing analysis of biogeographical distribution of bacterial communities in the black soils of northeast China[J]. Soil Biology & Biochemistry,2014,70(11):113-122.
- [13] 冉启洋,吕光辉,魏雪峰,等.艾比湖自然保护区土壤酶活性及理化性质[J].干旱区研究,2014,31(4):715-722.
- [14] 张雪梅,吕光辉,杨晓东,等.农田耕种对土壤酶活性及土壤理化性质的影响[J].干旱区资源与环境,2011,25(12):177-182.
- [15] 李秀玲,吕光辉,何雪芬.连作年限对土壤理化性质及酶活性的影响[J].干旱区资源与环境,2012,26(9):93-97.
- [16] 田幼华,谢辉,吕光辉.艾比湖湿地典型群落土壤酶分布规律初探[J].干旱区资源与环境,2010,24(9):173-178.
- [17] 刘晓星,吕光辉,杨晓东,等.艾比湖流域5种土壤类型的酶活性和理化性质[J].干旱区研究,2012,29(4):579-585.